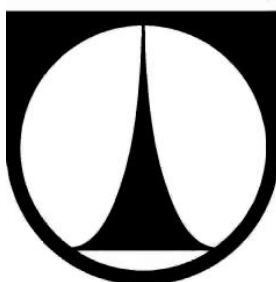


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**NÁVRH POROVNÁVACÍHO MĚŘENÍ NA ZAŘÍZENÍ NA
ZKOUŠKY PULSUJÍCÍM TLAKEM**

**DRAFT COMPARATIVE MEASUREMENT ON DEVICE
TO TESTING BY PULSATING PRESSURE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Luděk Randýsek

Květen 2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor: B2341Strojírenství

Zaměření: 2302R022 Stroje a zařízení

Dopravní stroje a zařízení

**NÁVRH POROVNÁVACÍHO MĚŘENÍ NA ZAŘÍZENÍ NA
ZKOUŠKY PULSUJÍCÍM TLAKEM**

**DRAFT COMPARATIVE MEASUREMENT ON DEVICE
TO TESTING BY PULSATING PRESSURE**

Bakalářská práce

KVM – BP – 251

Luděk Randýsek

Vedoucí bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Konzultant bakalářské práce: Ing. Oldřich Štajner RBCB/ETC

Počet stran: 38

Počet obrázků: 24

Počet příloh: 0

Počet výkresů: 0

Květen 2012

Návrh porovnávacího měření na zařízení na zkoušky pulsujícím tlakem

Anotace:

V bakalářské práci je analyzováno zařízení na zkoušení pulsujícím tlakem u firem Robert Bosch České Budějovice a Robert Bosch Stuttgart. Obsahuje návrh porovnávacího měření na zařízení na zkoušky pulsujícím tlakem, založený na měření deformací na zkoušeném vzorku, popis způsobu měření tenzometry, provedení zkoušek statickým přetlakem a tlakovými pulzacemi a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova:

Zkoušení pulsujícím tlakem

Návrh porovnávacího měření

Měření tenzometry

Draft comparative measurement on device to testing by pulsating pressure

Annotation:

In bachelor work is analyzed state of testing by pulsating pressure between company Robert Bosch České Budějovice and Robert Bosch Stuttgart. It contains draft comparative measurement on device to testing by pulsating pressure based on measurement deformation on testing sample, description of measurement by strain gauges, implementation testing by static overpressure and pressure pulsations and their evaluation.

Key words:

Testing by pulsating pressure

Draft comparative measurement

Measurement by strain gauges

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2012

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V dne

.....

podpis

Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Pavlu Němečkovi, vedoucímu bakalářské práce a Ing. Oldřichu Štajnerovi, RBCB/ETC, konsultantovi bakalářské práce, za odborný dohled, cenné rady a konsultace. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Čermákovi, Ph.D., RBCB/ETC, za spolupráci při řešení, cenné rady a čas s tím spojený, dále Petru Hovorkovi, RBCB/ETC, Ing. Petru Boubalovi, RBCB/ETC, Ing. Jakubu Trejbalovi, RBCB/ETC za odbornou pomoc a spolupráci při experimentálních měření, Ing. Michalu Vojtěchovskému, za cenné rady a připomínky. Také děkuji svým blízkým za podporu a oporu, kterou mi projevili při mém studiu a na závěr všem, kteří mi při studiu byli jinak nápomocní.

Seznam symbolů a jednotek

σ_h	horní napětí dynamického zatížení	[MPa]
σ_n	dolní napětí dynamického zatížení	[MPa]
σ_m	střední hodnota dynamického zatížení	[MPa]
σ_a	amplituda dynamického zatížení	[MPa]
t	čas	[s]
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
R_e	mez kluzu materiálu	[MPa]
σ_C	mez únavy	[MPa]
σ_N	mez časované únavy	[MPa]
N	počet cyklů	[-]
N_C	základní počet cyklů, charakteristický pro určitý materiál	[-]
RBCB/ETC	Zkušební centrum Robert Bosch České Budějovice	
GS/ETC	Zkušební centrum Robert Bosch Stuttgart	
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
Δl	délková změna tenzometru	[m]
ε	relativní deformace tenzometru ve směru jeho délky	[-]
l_0	počáteční délka	[m]
K	součinitel deformační citlivosti	[-]
R	nominální odpor tenzometru	[Ω]
ΔR	změna odporu	[Ω]

Obsah

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	TLAKOVÁ NÁDOBA FILTRU	11
2.2	ÚNAVA MATERIÁLU	12
2.2.1	Únavové zkoušky	12
2.3	PULSUJÍCÍ TLAK	13
2.4	VLASTNÍ ŘEŠENÍ	14
2.4.1	Zkoušení dílů tlakovými pulzacemi v RCB/ETC	14
2.4.2	Zkoušení dílů tlakovými pulzacemi v GS/ETC	16
2.5	NÁVRH POROVNÁVACÍHO MĚŘENÍ	18
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	20
3.1	MĚŘENÍ TENZOMETRY	20
3.2	ZKOUŠKA PŘETLAKEM	23
3.2.1	Vyhodnocení zkoušky přetlakem	24
3.3	ZKOUŠKA TLAKOVÝMI PULZACEMI (DRUCKSCHWELL)	26
3.4	MĚŘENÍ PRO OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NA ZAŘÍZENÍ PRO80HY	27
3.4.1	Měření pro tlak 10 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	28
3.4.2	Měření pro tlak 15 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	29
3.4.3	Měření pro tlak 20 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	30
3.4.4	Měření pro tlak 25 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	31
3.4.5	Měření pro tlak 30 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	32
3.4.6	Měření pro tlak 35 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	33
3.4.7	Měření pro tlak 40 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz	34
3.5	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ TLAKOVÝMI PULZACEMI	35
4	ZÁVĚR	36
	Seznam použité literatury	37

Použitá terminologie

Berstdruck- zkouška přetlakem (z německého Bersten + Druck)

Druckschwell - zkouška tlakovými pulzacemi (z německého Druck + Schwell)

Tlaková nádoba filtru - tlaková nádoba s filtrem, která je součástí palivového modulu

Mez únavy- největší hodnota napětí, při které vydrží zkušební těleso bez porušení teoreticky nekonečný počet zatěžovacích cyklů

Mez časové únavy- největší hodnota napětí, při které vydrží zkušební těleso bez porušení požadovaný počet zatěžovacích cyklů

Hydraulikpulseranlage- zařízení na zkoušky tlakovými pulzacemi v GS/ETC

PRO80HY 80/25- zařízení pro zkoušky tlakovými pulzacemi v RBCB/ETC

1 ÚVOD

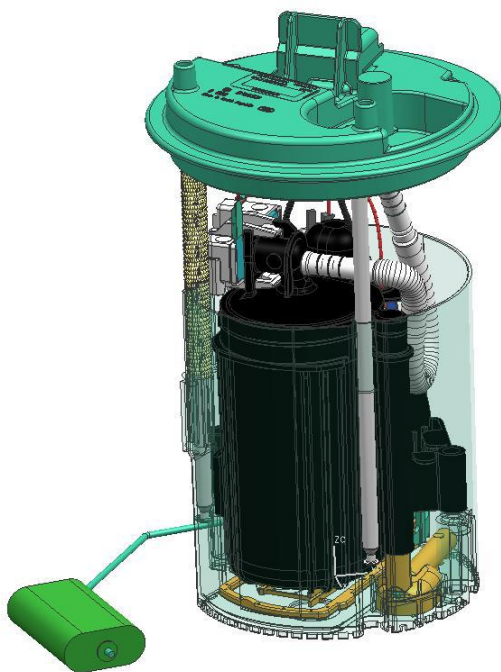
Zkušebnictví patří k velmi důležité části vývoje výrobků a to jak pro automobilový průmysl, tak i pro ostatní strojírenská odvětví. Hlavním cílem zkušebnictví je ověření dodržení požadavků zákazníka, co se týče bezpečnosti, spolehlivosti a životnosti výrobku, ale také odhalení kritických míst v konstrukci výrobku. S nástupem výkonných počítačů do technické praxe se rychle rozšířila výpočtová metoda konečných prvků a s ní na určitou dobu i představa, že význam experimentu poklesne. Záhy se však ukázalo, že účinky na bezpečnost provozu a životnost zatěžovaného výrobku jsou složitější, než jak se daří je respektovat v počítačových modelech, které nedostatečně přibližují fyzikální realitu. [1]

Cílem této bakalářské práce je návrh porovnávacího měření na zařízení na zkoušky pulsujícím tlakem mezi firmami Robert Bosch České Budějovice (dále jen RBCB/ETC) a Robert Bosch Stuttgart (dále jen GS/ETC). Impulsem pro toto téma bakalářské práce byla výrazná neshoda ve výsledcích měření u tlakové nádoby filtru palivového čerpadla.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TLAKOVÁ NÁDOBA FILTRU

Palivové čerpadlo je důležitá součást pro chod motoru. Funkcí čerpadla je zásobovat palivový okruh dostatečným množstvím paliva předepsaného tlaku, který je zajišťován regulačním ventilem. Palivové čerpadlo je součástí palivového modulu, který se nachází v palivové nádrži automobilu. Dále se omezíme jen na nádobu filtru palivového modulu (obr 1). Jedná se o nádobu, ve které je filtr, přes který proudí palivo od pumpy dále do palivového okruhu. Tato nádobka je vystavena působení paliva, tlakovým pulzacím a změnám teploty. Nádobka je vyrobena z plastu Ultraform® N2320C, který byl vyvinut přímo pro tuto aplikaci.



Obr. 1 Modul palivového čerpadla ("černě" tlaková nádobka filtru) [6]

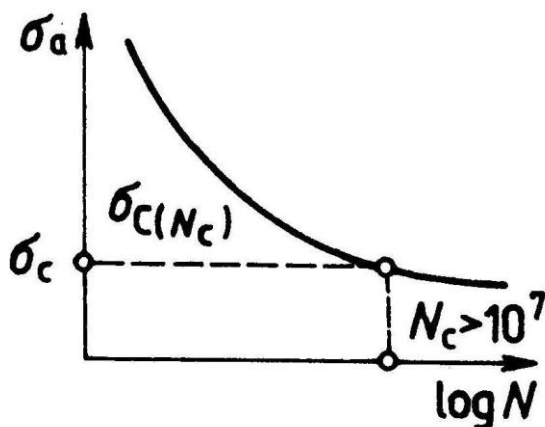
Kromě agresivního prostředí, které je způsobeno chemickou povahou paliva, které se navíc za provozu zahřívá, je palivové čerpadlo vystaveno tlakovým pulzacím, vznikajících při změnách režimu motoru (např. startování, akcelerační). Dále musí odolávat vnějším teplotám, které se pohybují od několika desítek stupňů pod nulou po několik desítek stupňů nad nulou. [6]

2.2 ÚNAVA MATERIÁLU

Únava materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností, vyvolaný cyklickým (kmitavým) zatěžováním, přičemž nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti R_m a ve většině případů i menší než mez kluzu R_e . V důsledku toho dochází v materiálu k hromadění poškození, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem. [3]

2.2.1 Únavové zkoušky

Cílem zkoušek je stanovení hodnoty meze únavy σ_c a meze časované únavy σ_N pro definovaný charakter opakovaného kmitavého zatížení. Zkušební tělesa jsou zatěžována napětím o amplitudě σ_a a hodnotou středního napětí σ_m , až do porušení součásti, kdy je stanoven počet cyklů do lomu N . Zkouška je též ukončena, jestliže se zkušební těleso neporuší po základním počtu kmitů N_c , který je charakteristický pro určitý materiál, pro lehké kovy a slitiny je N_c rovno $1 \cdot 10^8$ kmitů. Při zkoušení se nejprve volí vyšší zatížení, aby k porušení došlo po relativně nízkém počtu kmitů (zpravidla $N_1 < 10^5$). Postupným snižováním zatížení se určí amplituda napětí na mezi únavy σ_c , na které mají všechna zkušební tělesa životnost $N > N_c$. Výsledky se zpracovávají graficky v podobě Wöhlerovy křivky (obr. 2) v souřadnicích $\log N$ - σ_a (popř. σ_h). [4]



Obr. 2 Wöhlerova křivka [5]

2.3 PULSUJÍCÍ TLAK

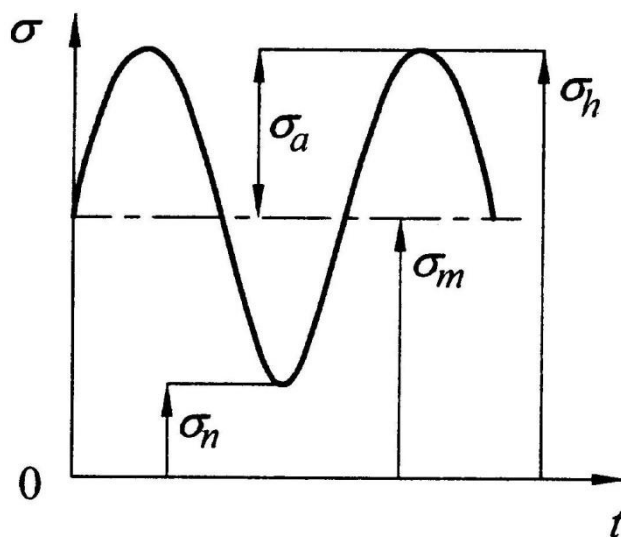
Pulsující tlak je dynamické tlakové zatížení, které je určeno horním napětím σ_h , dolním napětím σ_n a frekvencí zatěžování. Z těchto údajů získáme střední hodnotu napětí:

$$\sigma_m = (\sigma_h + \sigma_n)/2 \quad (1)$$

a amplitudu napětí:

$$\sigma_a = (\sigma_h - \sigma_n)/2 \quad (2)$$

Pulsující zatížení viz obr. 3.



Obr. 3 pulsující zatížení [2]

V této práci bude pulsující tlak označován hodnotou horního napětí σ_h a hodnota dolního napětí σ_n bude vždy 1/10 hodnoty horního napětí. Takže např. označením „tlak 10bar“ se bude rozumět tlak o horním napětí 10 bar a dolním napětí 1 bar, střední napětí bude 5,5 bar a amplituda napětí 4,5 bar.

2.4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

2.4.1 Zkoušení dílů tlakovými pulzacemi v RBCB/ETC

V RBCB/ETC a v GS/ETC se provádí únavové zkoušky pro díly palivové soustavy. Jedná se o palivová vedení z různých materiálů, snímače hladiny v palivové nádrži, nádobky filtru palivového čerpadla atd. Výstupem těchto zkoušek je doklad životnosti výrobků namáhaných vnitřním tlakem, popř. vyšetření meze únavy a meze časové únavy.

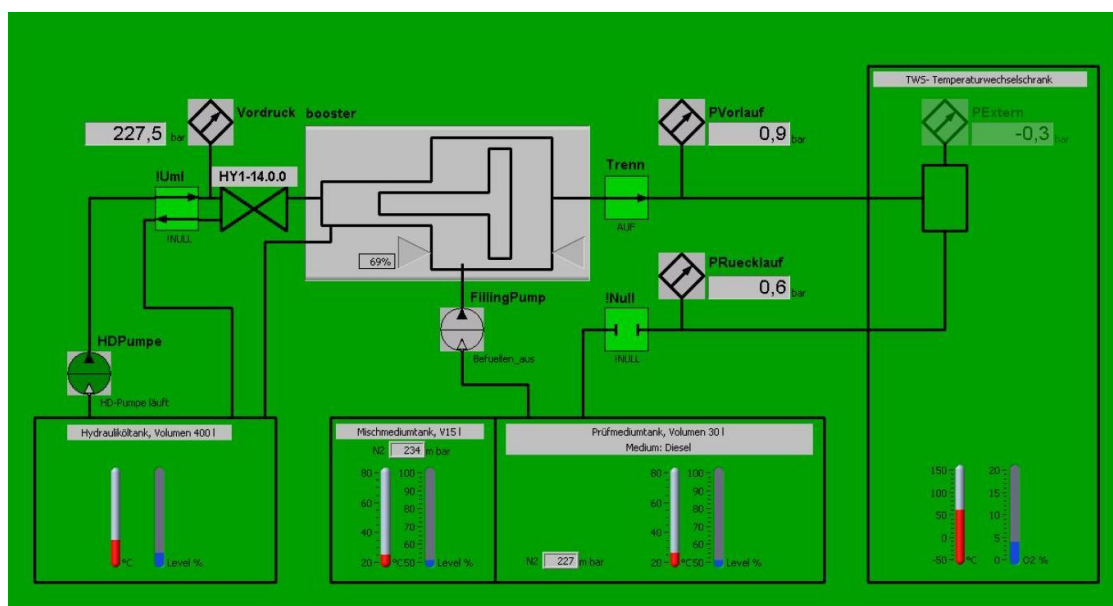
K docílení co nejreálnějšího zkoušení, je potřeba navodit stav, který se bude podobat provoznímu režimu. K navození tohoto stavu jsou zde díly podrobeny únavovým zkouškám na stroji s označením *PRO80HY 80/25* (viz obr. 4), který umí generovat tlakové pulzace. Protože musí být zkoušené kusy vystaveny při zkoušce různým teplotám, je součástí zařízení i teplotní komora. Na řídicím panelu stroje lze nastavit tlak 0,5bar až 80 bar, frekvenci zatěžování až 25Hz a teplotu -40°C až 160°C. Aby bylo možné generovat statické a dynamické tlaky s použitím řady zkušebních médií s požadovanými rozsahy a frekvencemi, je zařízení vybaveno dvěma okruhy.



obr. 4 zařízení *PRO80HY 80/25*

V primárním okruhu cirkuluje hydraulický olej. Primární tlak (~ 230 bar) vytváří hydraulické čerpadlo poháněné elektromotorem. Tímto tlakem může být ovládán píst (tlakový převodník) dynamicky či staticky. Volbu pístu provede obsluha v závislosti na typu zkoušky. Objem dynamického válce na sekundární straně činí cca 1 litr. Servoventily a tlakové převodníky jsou vybaveny systémy pro odměřování dráhy.

V sekundárním okruhu mohou být používána různá přípustná zkušební média. Pro plnění zkoušeného dílu a přívodů je zde k dispozici plnicí čerpadlo. Jeho prostřednictvím je možné čerpat zkušební médium přes zkoušený díl a filtr zpět do nádrže zkušebního média. Tímto způsobem je jednoduše zajištěno odvzdušnění, zařízení je rovněž chráněno před nečistotami ve zkoušených dílech. Protože jedním ze schválených zkušebních médií je i benzín a zkouška probíhá ve skříni pro střídání teplot při zvýšené teplotě, je celý sekundární okruh inertizován dusíkem. Schéma zařízení viz obr. 5.



obr. 5 schéma zařízení PRO80HY 80/25

2.4.2 Zkoušení dílů tlakovými pulzacemi v GS/ETC

V GS/ETC se zkoušení provádí na zařízení „Hydraulikpulseranlage“ (viz obr. 6), pracujícím na stejném principu jako v RBCB/ETC. Stroj generuje hydraulické pulzy nastavitelné velikosti a frekvence při zvolené teplotě.



obr. 6 zařízení „Hydraulikpulseranlage“

Zařízení má taktéž oddělený primární a sekundární tlakový okruh, kvůli generování statických a dynamických tlaků s použitím různých zkušebních médií.

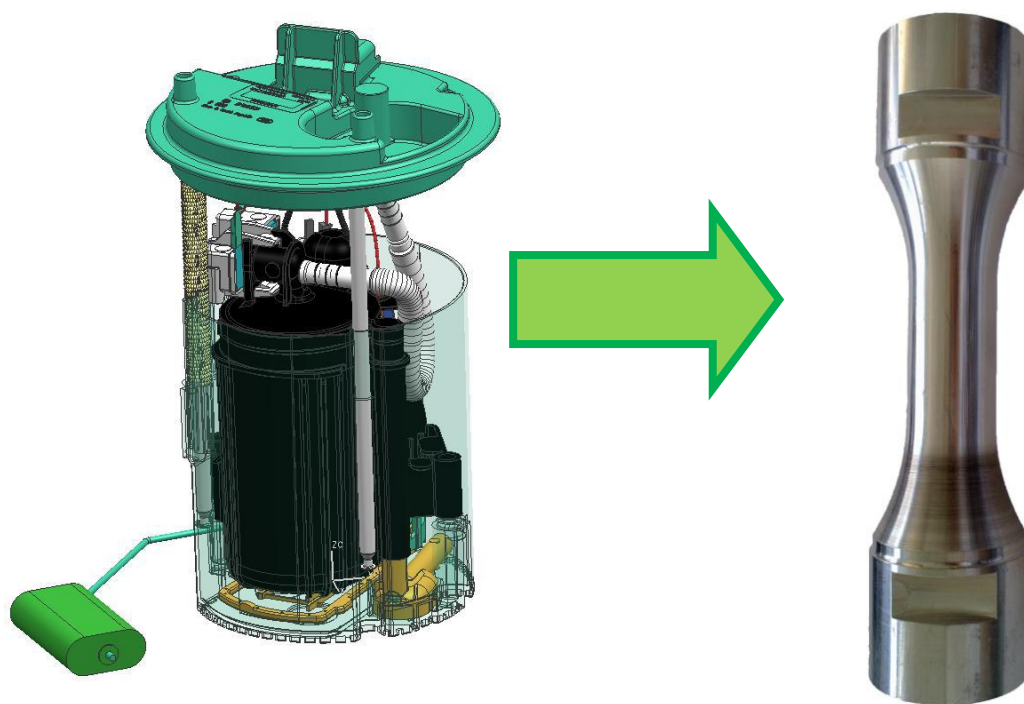
V primárním okruhu rovněž cirkuluje hydraulický olej. Primární tlak vytváří hydraulické čerpadlo poháněné elektromotorem, a to ve dvou stupních pro 120 bar a 160 bar. Primární tlak je k dispozici pro servoventily “Dynamicky“ a “Staticky“, a tím i pro primární stranu příslušného tlakového převodníku.

V sekundárním okruhu se taktéž používají různá zkušební média, jedním z nich je i benzin, a tak je celý sekundární okruh inertizován dusíkem. Schéma zařízení viz obr. 7.

2.5 NÁVRH POROVNÁVACÍHO MĚŘENÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, impulsem pro toto téma bakalářské práce byla výrazná neshoda ve výsledcích měření u tlakové nádoby filtru palivového čerpadla, na výše představených zařízeních. V RBCB/ETC vydržela nádoba přes milion cyklů, zatímco v Německu v GS/ETC vydržela kolem tří set tisíc cyklů.

Protože při srovnávacích měřeních popsaných zařízení došlo k značné neshodě (střední počet cyklů do výpadku při daném tlakovém profilu se lišil až o 700 000), bylo nutno eliminovat počet neznámých navržením normály- viz obr. 8, na které se mělo ukázat, jestli na konstrukčně „jednoduchém“ vzorku bude dosaženo shody. Tlaková nádoba filtru palivového čerpadla se tak nahradila duralovým tělískem. Toto nové zkušební tělísko v RBCB/ETC bez porušení vydrželo přes 10 milionů cyklů, při zatížení 40 bar a frekvenci 25 Hz. Poté bylo vyjmuta ze zkušebního zařízení z důvodu vysokých nákladů na zkoušení.



obr. 8 duralové zkušební tělísko pro srovnávací měření

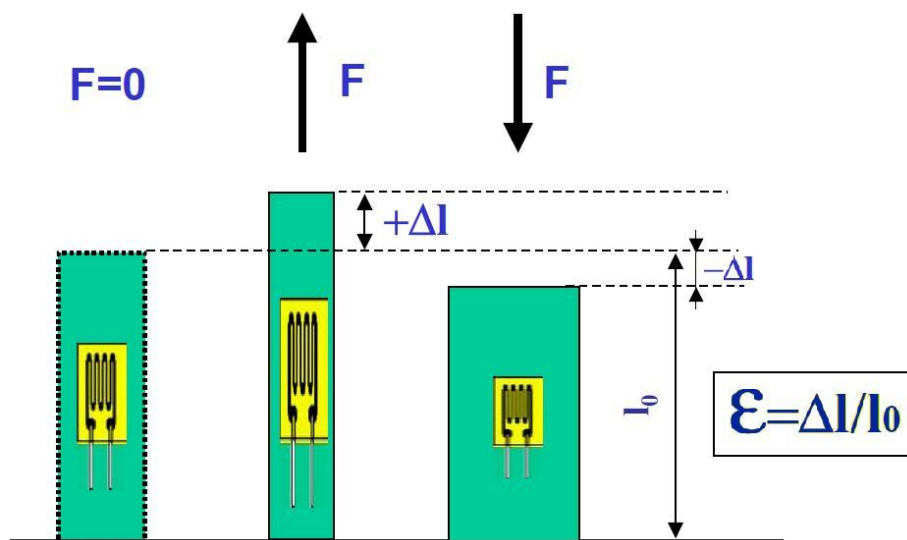
Z tohoto důvodu bude navržena nová normála s optimalizovanou šířkou stěny a pokud možno „definovaným“ místem destrukce.

Pro optimální návrh nové normály by bylo vhodné popsat chování stávající. Z tohoto důvodu byla provedena dále popsaná měření, tj. měření deformace normály v závislosti na tlaku a rovněž rychlosti dynamického zatížení. Deformace byla měřena pomocí tenzometrů.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 MĚŘENÍ TENZOMETRY

Fyzikální podstata, na níž jsou založeny odporové tenzometry, je závislost odporu elektrického vodiče na jeho prodloužení v důsledku mechanického namáhání. Princip měření znázorněn na obr. 9.



Obr. 9 princip funkce tenzometru [7]

Tenzometr se vlivem zatížení deformuje, prodlužuje nebo zkracuje, mění tedy i svůj průřez, zmenšuje nebo zvětšuje, a tak mění svůj odpor, který je lineárně úměrný prodloužení na povrchu materiálu.

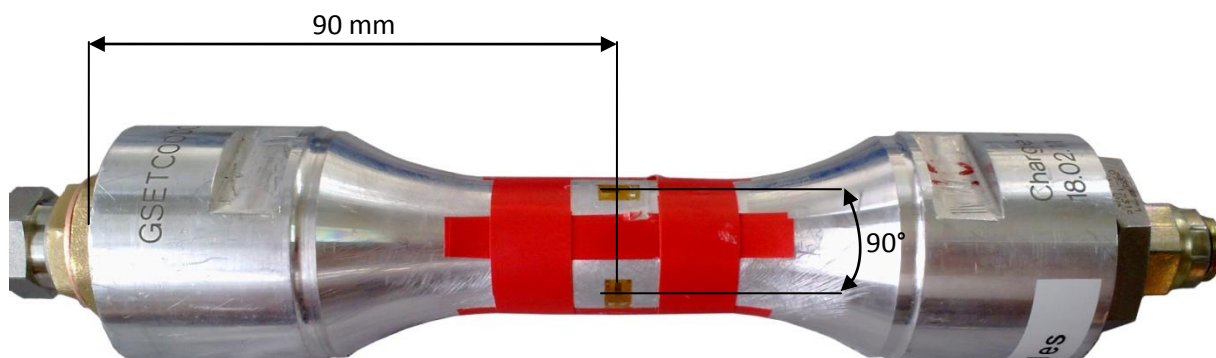
Charakteristickou veličinou tenzometru je jeho nominální odpor v základním nenamáhaném stavu ($F=0$). Častěji se však udává koeficient K , tj. součinitel deformační citlivosti, pro který platí vztah:

$$\Delta R/R = K * \epsilon \quad (3)$$

Veličina ϵ představuje relativní deformaci tenzometru ve směru délky tenzometru. Pro naše zkoušení se použily foliové tenzometry s odporem 120Ω , koeficientem $K = 2,03 \pm 1\%$ a s příčnou citlivostí $0,1\%$.

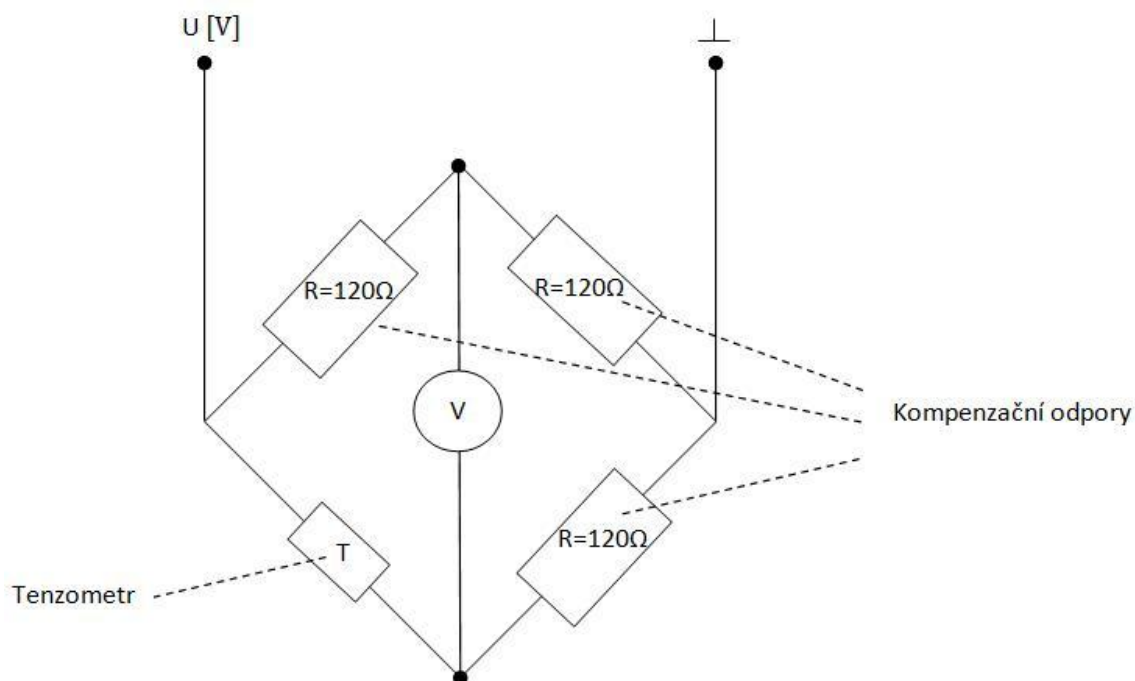
Před samotným lepením je důležité místa určení zdrsnit, např. smirkovým papírem, aby bylo dosaženo dobrého spojení. Po obroušení se plocha odmastí. Na místa určení se vyznačí osovým křížem přesné umístění tenzometru, povrch se znovu odmastí a poté se už tenzometr může nalepit. Je potřeba dbát na co nejpresnější vyznačení

osového kříže a co nejpřesnější nalepení. Pootočením o 5° totiž vzniká chyba v naměřených hodnotách přibližně 1%. Tenzometry byly nalepeny v příčném a podélném směru pro měření deformací v obou směrech. Jsou umístěny v polovině délky zkušebního vzorku vždy po 90° a střídá se příčný a podélný směr- znázorněno na obr. 10. [8]



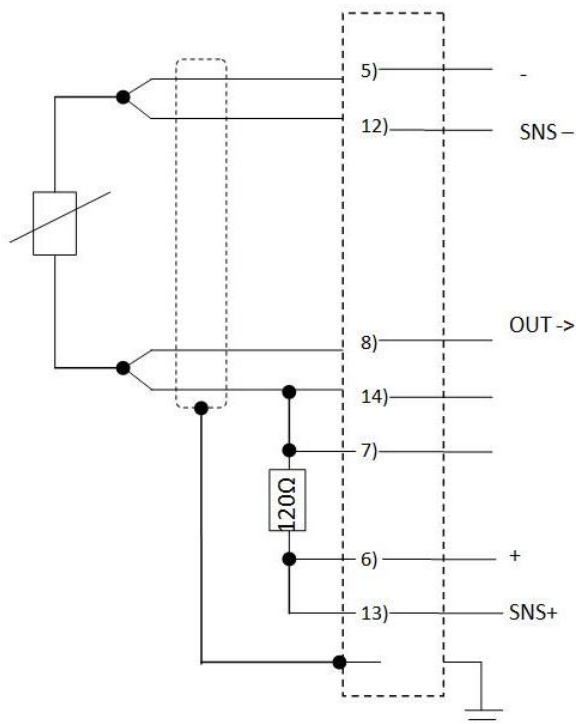
Obr. 10 umístění tenzometrů na zkušebním vzorku

Změny odporu v tenzometru se obvykle měří v můstkovém zapojení (Wheatstonův můstek). Pro naše měření bylo použito zapojení do čtvrtinového můstku doplněného do polovičního můstku, schéma viz obr. 11.



Obr. 11 zapojení tenzometru do čtvrtinového můstku doplněného do polovičního můstku

Od tenzometru vedou dva lakované vodiče o průměru 0,1mm, ty jsou připájeny na odstíněný čtyřdrátový vodič, připojený k dvouřádkovému konektoru typu Cannon D-SUB 15- schéma viz obr. 12. Takto připravený tenzometr se připojí k měřicímu zesilovači Spider8 - obr. 13, který je připojen k počítači se softwarem Catman Easy, který zaznamenává naměřené hodnoty.



Obr. 12 zapojení do konektoru typu Cannon D-SUB 15

Nejprve se provede zkouška přetlakem (Berstdruck). Zkouška nám poslouží jednak k vyzkoušení zapojení tenzometrů a jednak k určení velikosti tlaků, při kterých se vzorek ještě neporuší.



Obr. 13 měřicí zesilovač Spider8

3.2 ZKOUŠKA PŘETLAKEM

Zkouška přetlakem (Berstdruck) je statickou zkouškou, kde se zjišťuje max. hodnota tlaku, kterou zkoušený díl vydrží. Zkouška nám poslouží pro ověření správného nalepení a zapojení tenzometrů a zároveň přinese informace o oblastech tlaků, kde se budeme moci pohybovat při zkoušce pulsujícím tlakem, aniž by se vzorek porušil. Pracoviště pro zkoušku přetlakem viz obr. 14.



Obr. 14 pracoviště pro zkoušku přetlakem

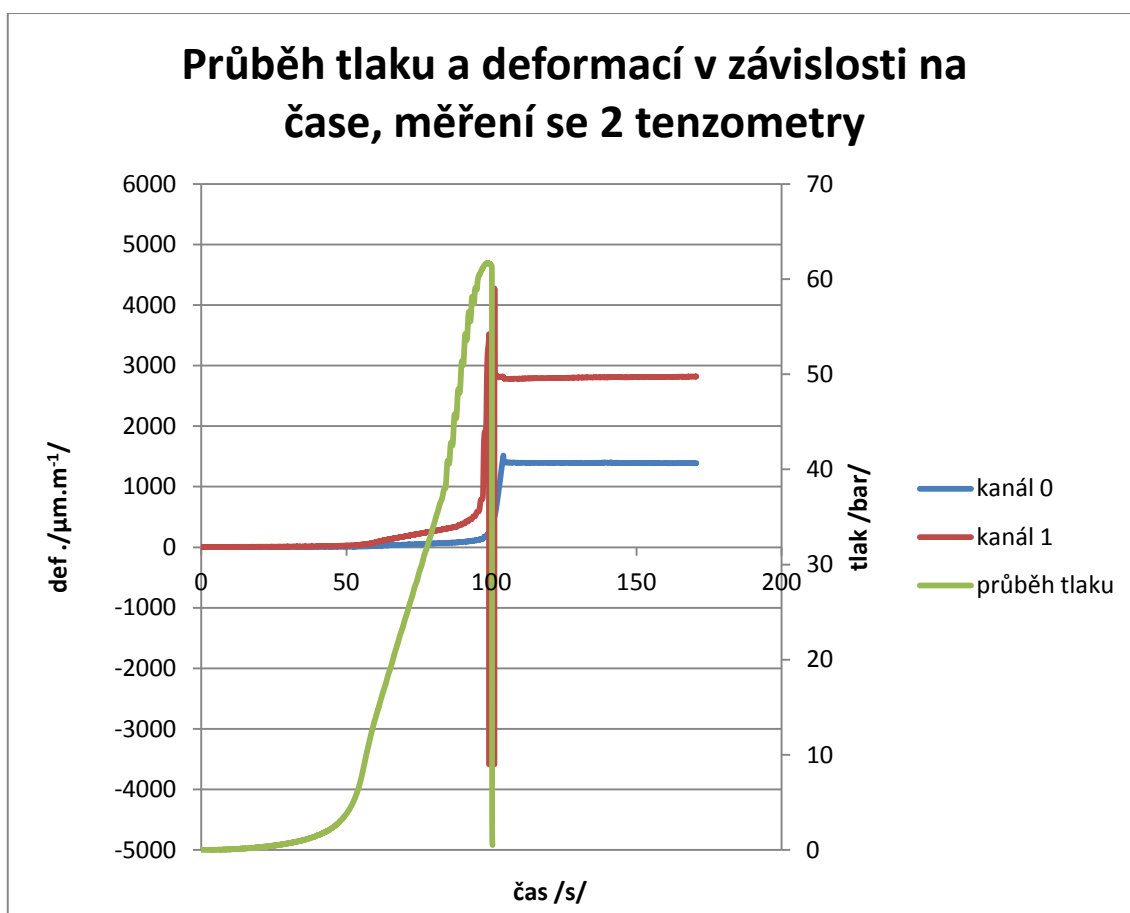
Zkoušení se nejdříve provedlo na vzorku se dvěma tenzometry, umístěnými ve středu zkušebního tělesa po 90° a to příčně (kanál 1) a podélně (kanál 0). Průběh tlaku a deformací na zkušebním vzorku je zobrazen v grafu 1. Poté se zkoušení převedlo na měření se čtyřmi tenzometry, kvůli porovnání shodnosti výsledků. Průběh tlaku a deformací je zobrazen v grafu 2 (kanál 1 a 3 jsou příčné deformace, kanál 0 a 2 jsou podélné deformace).

3.2.1 Vyhodnocení zkoušky přetlakem

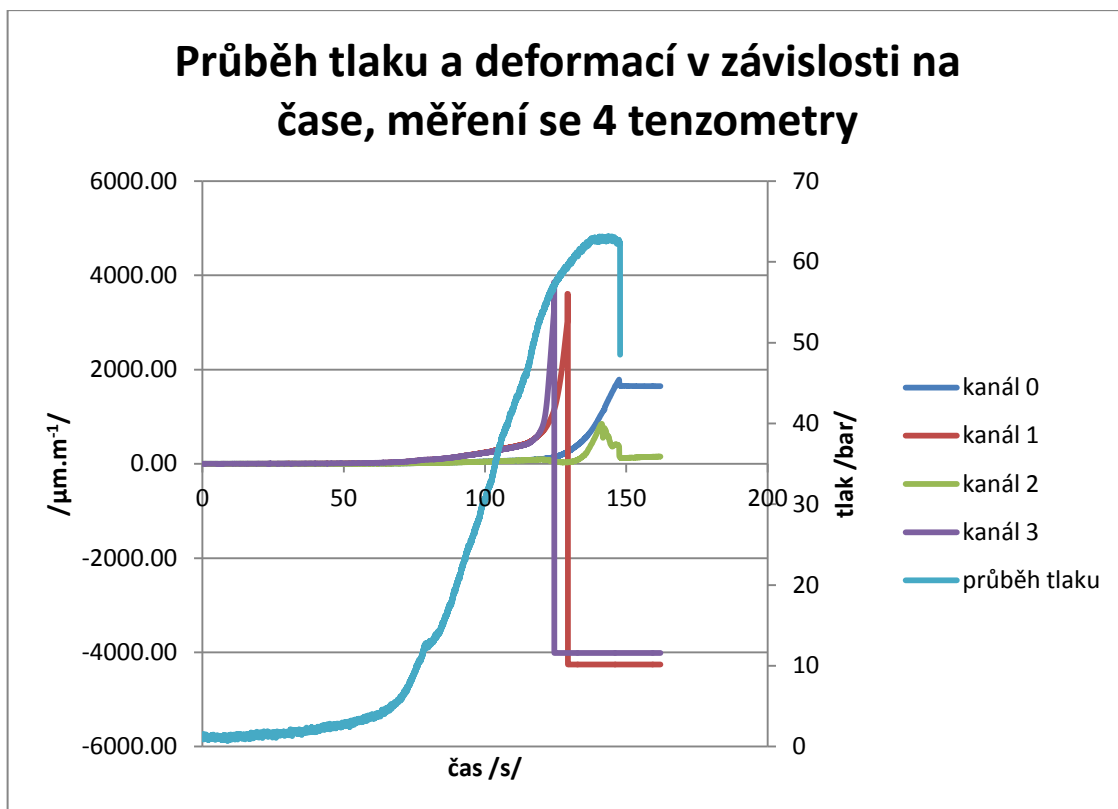
Zkouškou přetlakem jsem zjistil, že se zkušební těleso více deformuje v příčném směru (tenzometr umístěný kolmo k ose souměrnosti tělesa), jak jsem předpokládal, a že se vzorek porušil při tlaku 61,7 bar při první zkoušce a při tlaku 63,2 bar při druhé zkoušce.

Z grafu na obr. 15 vidíme, že nárůst tlaku je mezi 50. s a 75. s u prvního měření téměř lineární. Z grafu na obr. 16 vidíme, že je nárůst tlaku mezi 75. s a 90. s u druhého měření téměř lineární.

Zkouškou jsem zjistil, že se při dalším zkoušení budu moci pohybovat v tlacích do cca 50 barů. Z grafu je vidět, že tenzometry zaznamenávaly deformace do cca 3000 $\mu\text{m.m}^{-1}$, což odpovídá tlaku asi 50 bar.



Obr. 15 průběh tlaku a deformací se dvěma tenzometry



Obr. 16 průběh tlaku a deformací se čtyřmi tenzometry

3.3 ZKOUŠKA TLAKOVÝMI PULZACEMI (DRUCKSCHWELL)

Jak bylo zmíněno ve druhé kapitole, zkouška se provádí na stroji PRO80HY 80/25, který je schopen generovat tlakové pulzace. Pulzace mají přibližně sinusový průběh. Parametry zkoušky jsou frekvence zatěžování, velikost tlakových pulzací a teplota. Tyto parametry se definují na řídicím panelu stroje. Pracoviště pro zkoušky tlakovými pulzacemi je na obrázku 17.



Obr. 17 pracoviště pro zkoušky tlakovými pulzacemi

3.4 MĚŘENÍ PRO OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NA ZAŘÍZENÍ PRO80HY

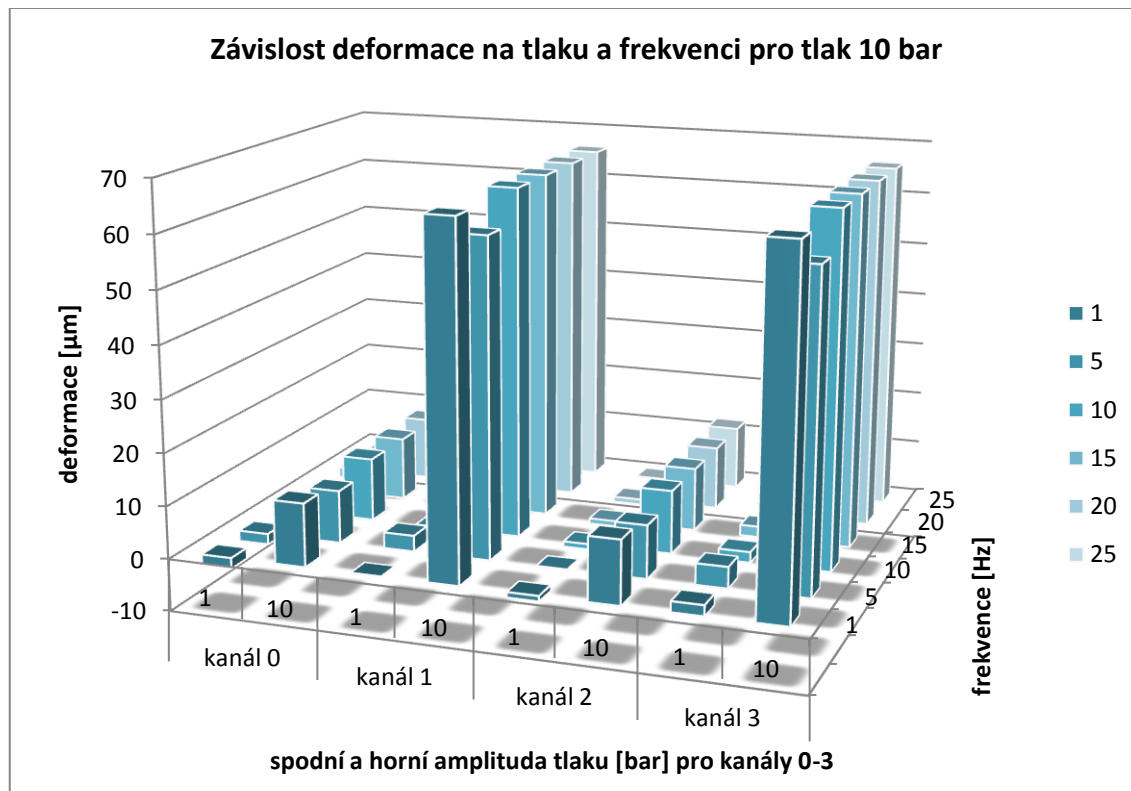
Abych stanovil vztah mezi tlakovými pulzacemi, deformací a rychlostí dynamické změny, jestli se mění amplituda deformace s narůstající frekvencí při konstantním tlaku, provedu následující měření tenzometry. Začnu na tlaku 10 bar a budu ho po 5 barech zvyšovat až na 40 barů. Frekvence každého tlakového profilu postupně nastavím na f : 1Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz a 25Hz. Budu tedy mít 7 hodnot tlaků a pro každý z nich 6 hodnot frekvencí, tudíž 42 měření. Kvůli větší přehlednosti bude mít každý tlak svůj graf. Do tabulek naměřených hodnot se vzaly konstantní hodnoty amplitud tlaků a deformací. Podrobné průběhy tlaků a deformací jsou na přiloženém CD.

3.4.1 Měření pro tlak 10 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

Při měření pro tlak 10 bar se horní hodnoty podélných deformací pohybovaly v průměru 11,7 μ m pro oba tenzometry a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od -0,7 μ m do -2 μ m. Horní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 64,8 μ m do 65 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 0,5 μ m do 2,3 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 1 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 18.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μ m]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μ m]	kanál 0	1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2.0
		10	12	10	12	12	12	12	11.7
	kanál 1	1	0	3	0	0	0	0	0.5
		10	66	60	66	66	66	66	65.0
	kanál 2	1	-1	0	-1	-1	-1	0	-0.7
		10	12	10	12	12	12	12	11.7
	kanál 3	1	2	4	2	2	2	2	2.3
		10	66	59	66	66	66	66	64.8

Tabulka 1 hodnoty deformací pro tlak 10 bar



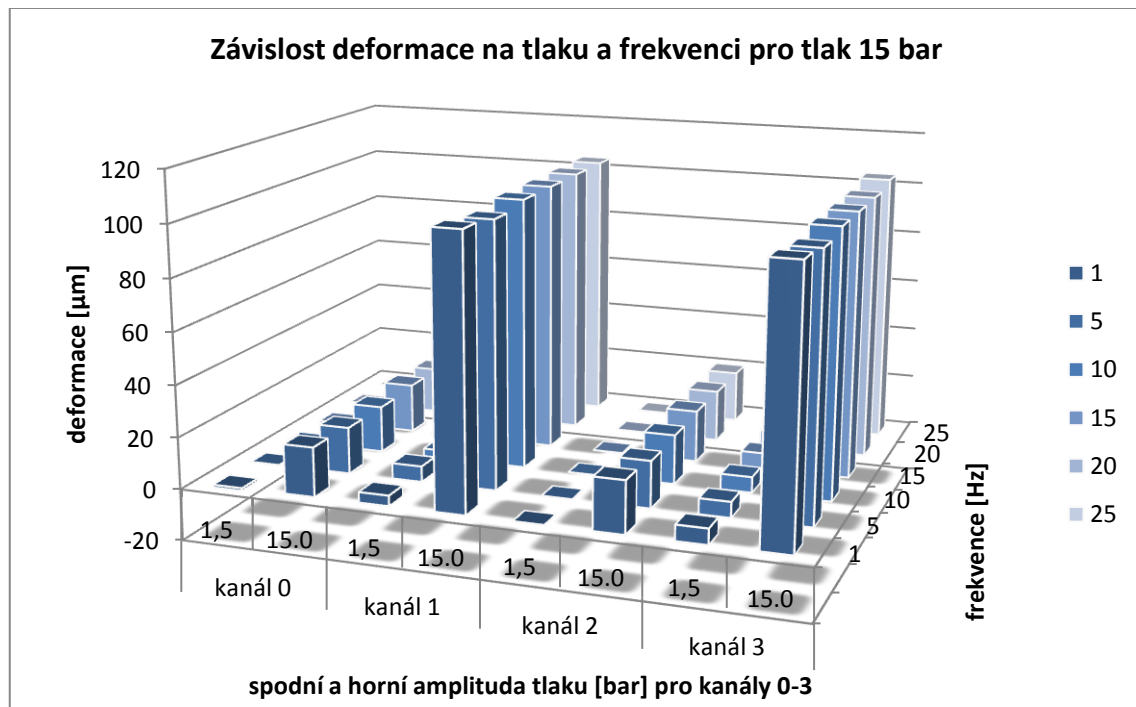
Obr. 18 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 10 bar

3.4.2 Měření pro tlak 15 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

U měření pro tlak 15 bar se horní hodnoty podélných deformací pohybovaly v průměru od 18,5 μ m do 19,5 μ m a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od -0,5 μ m do 0 μ m. Horní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 102 μ m do 103,7 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 3,8 μ m do 5,7 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 2 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 19.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μ m]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μ m]	kanál 0	1,5	-1	0	-1	-1	0	0	-0.5
		15.0	19	18	18	19	18	19	18.5
	kanál 1	1,5	4	6	3	4	4	2	3.8
		15.0	104	102	104	104	104	104	103.7
	kanál 2	1,5	0	0	0	0	0	0	0.0
		15.0	20	18	19	20	20	20	19.5
	kanál 3	1,5	6	6	6	6	6	4	5.7
		15.0	102	100	102	102	102	104	102.0

Tabulka 2 hodnoty deformací pro tlak 15 bar



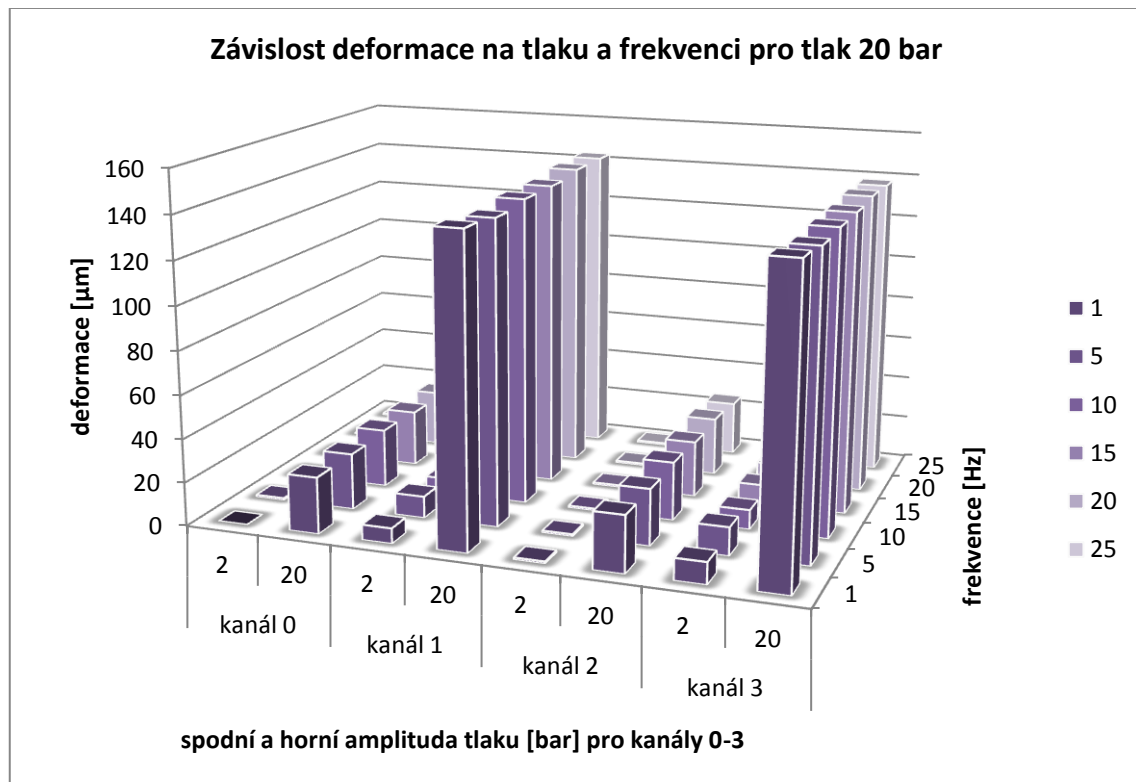
Obr. 19 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 15 bar

3.4.3 Měření pro tlak 20 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

Při měření pro tlak 20 bar se horní hodnoty podélných deformací pohybovaly v průměru od 26 μ m do 26,2 μ m a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od 0,5 μ m do 1 μ m. Horní hodnoty u příčných deformací se pohybovaly v průměru od 138,2 μ m do 141,3 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 7,2 μ m do 9,3 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 3 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 20.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μm]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μm]	kanál 0	2	0	1	0	1	0	1	0.5
		20	26	26	27	26	26	25	26.0
	kanál 1	2	7	10	7	8	6	5	7.2
		20	141	139	141	141	143	143	141.3
	kanál 2	2	1	1	1	1	1	1	1.0
		20	26	26	27	26	27	25	26.2
	kanál 3	2	10	13	9	9	8	7	9.3
		20	139	137	138	138	139	138	138.2

Tabulka 3 hodnoty deformací pro tlak 20 bar



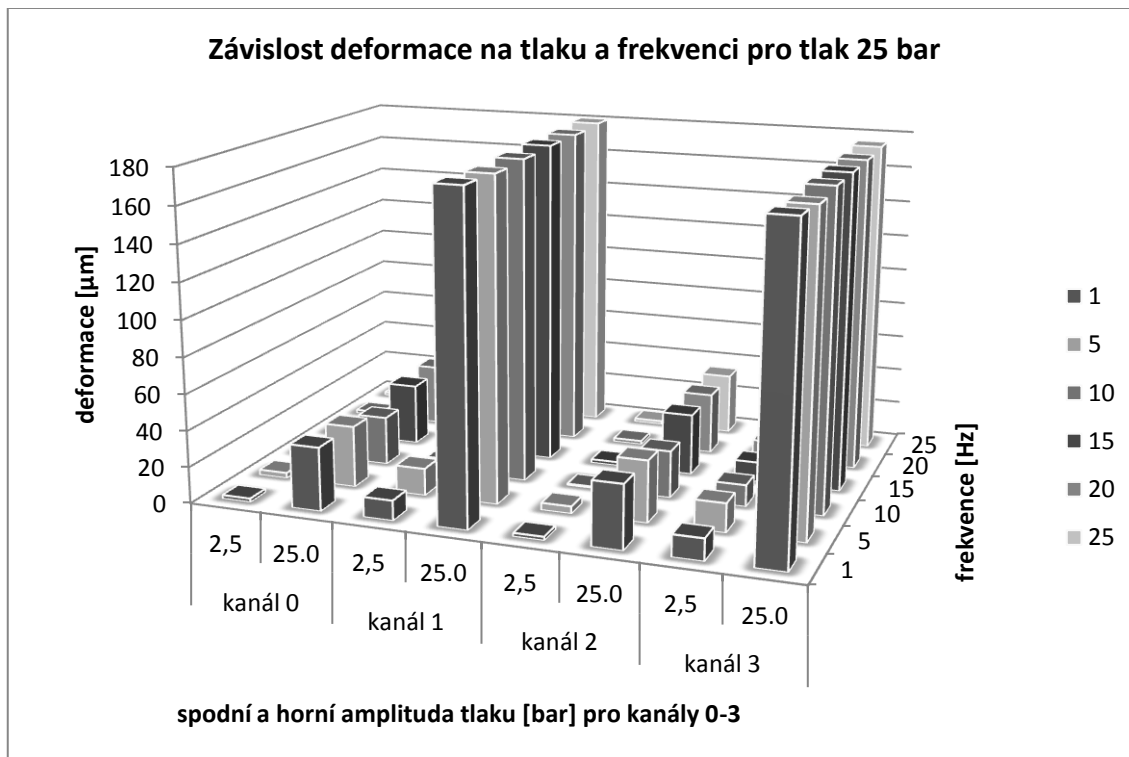
Obr. 20 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 20 bar

3.4.4 Měření pro tlak 25 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

U měření pro tlak 25 bar se horní hodnoty podélných deformací pohybovaly v průměru od 32,8 μ m do 33 μ m a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od 1,8 μ m do 2,2 μ m. Horní hodnoty u příčných deformací se v průměru pohybovaly od 173,8 μ m do 178,5 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se v průměru pohybovaly od 10,2 μ m do 11,7 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 4 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 21.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μm]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μm]	kanál 0	2,5	2	3	0	2	2	2	1.8
		25.0	35	34	27	34	34	34	33.0
	kanál 1	2,5	11	15	7	10	9	9	10.2
		25.0	178	177	178	179	179	180	178.5
	kanál 2	2,5	2	4	1	2	2	2	2.2
		25.0	35	34	26	34	34	34	32.8
	kanál 3	2,5	12	16	12	11	10	9	11.7
		25.0	174	172	174	174	174	175	173.8

Tabulka 4 hodnoty deformací pro tlak 25 bar



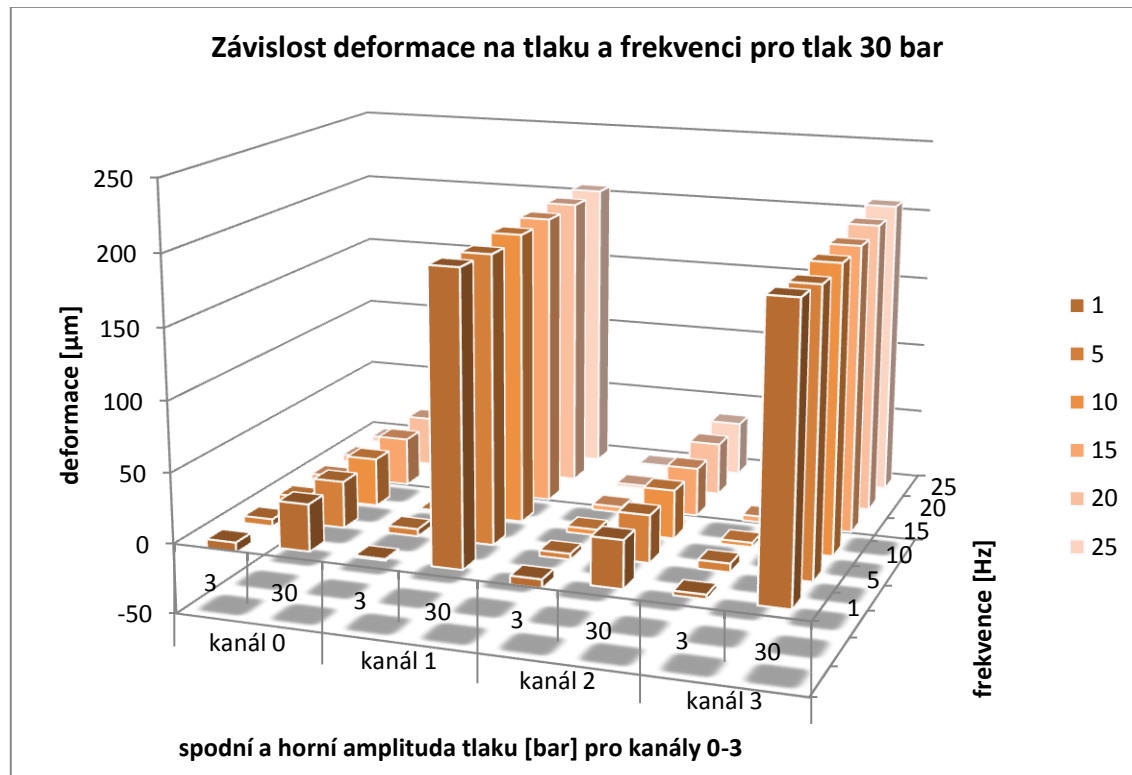
Obr. 21 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 25 bar

3.4.5 Měření pro tlak 30 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

Při měření pro tlak 30 bar se horní hodnoty podélných deformací pohybovaly v průměru od 34,2 μ m do 34,8 μ m a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od -5,2 μ m do -3,3 μ m. Horní hodnoty příčných deformací se v průměru pohybovaly od 201 μ m do 203,3 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se pohybovaly v průměru od 2,5 μ m do 5,2 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 5 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 22.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μm]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μm]	kanál 0	3	-7	-5	-5	-5	-5	-4	-5.2
		30	33	33	34	34	35	36	34.2
	kanál 1	3	1	5	1	4	2	2	2.5
		30	202	200	203	204	205	206	203.3
	kanál 2	3	-6	-4	-4	-4	-2	0	-3.3
		30	33	33	34	34	37	38	34.8
	kanál 3	3	3	6	3	4	7	8	5.2
		30	199	196	199	200	204	208	201.0

Tabulka 5 hodnoty deformací pro tlak 30 bar



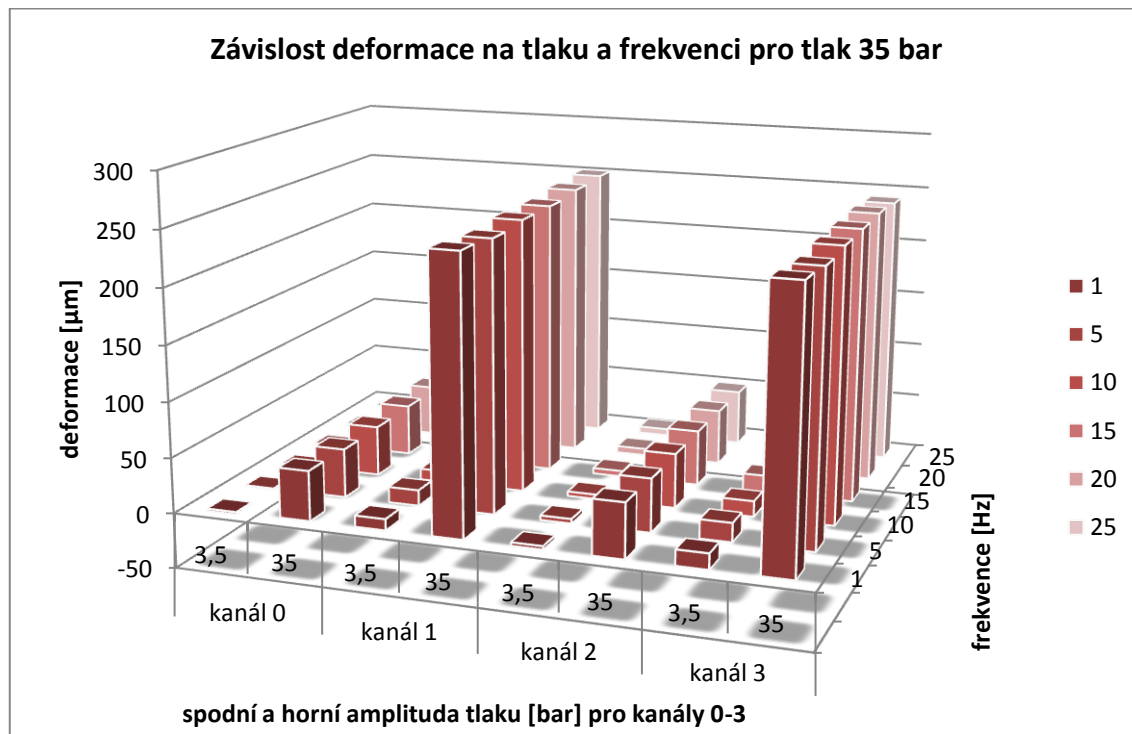
Obr. 22 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 30 bar

3.4.6 Měření pro tlak 35 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

U měření pro tlak 35 bar byly horní hodnoty podélných deformací naměřeny v průměru od 45,3 μ m do 49,3 μ m a dolní hodnoty podélných deformací v průměru od -1 μ m do 4,7 μ m. Horní hodnoty příčných deformací se v průměru pohybovaly od 242,8 μ m do 246,8 μ m a dolní hodnoty příčných deformací se v průměru pohybovaly od 11,8 μ m do 14,8 μ m. Naměřené hodnoty viz tabulka 6 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 23.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μm]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μm]	kanál 0	3,5	-2	-1	-1	-1	-1	0	-1.0
		35	45	44	45	46	46	46	45.3
	kanál 1	3,5	10	14	10	12	12	13	11.8
		35	246	243	246	246	249	251	246.8
	kanál 2	3,5	3	4	4	5	6	6	4.7
		35	49	48	49	50	50	50	49.3
	kanál 3	3,5	14	17	14	15	14	15	14.8
		35	243	240	243	244	245	242	242.8

Tabulka 6 hodnoty deformací pro tlak 35 bar



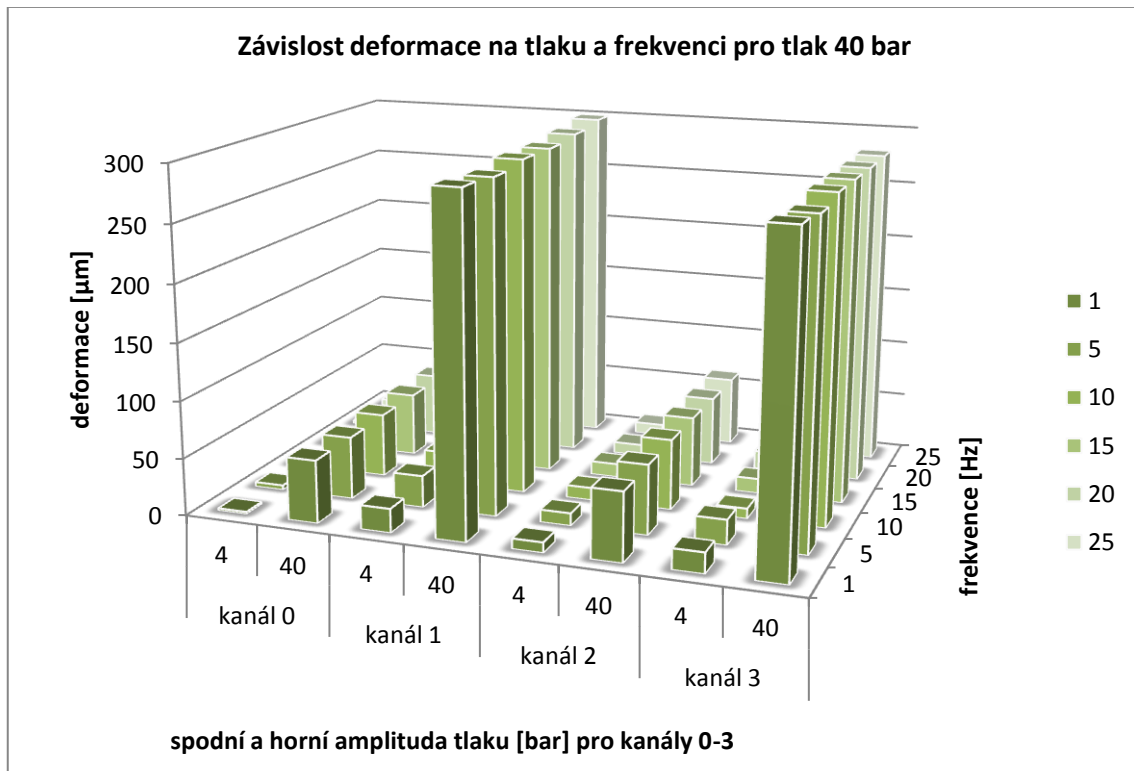
Obr. 23 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 35 bar

3.4.7 Měření pro tlak 40 bar s frekvencemi od 1Hz do 25Hz

Při měření pro tlak 40 bar byly horní hodnoty podélných deformací naměřeny v průměru od 56μm do 61,2μm a dolní hodnoty podélných deformací od 3,5μm do 10,5μm. Horní hodnoty příčných deformací se v průměru pohybovaly od 280,2μm do 293,3μm a dolní hodnoty příčných deformací se pohybovaly od 15,3μm do 25,8μm. Naměřené hodnoty viz tabulka 7 a graf závislosti deformace na tlaku a frekvenci viz obr. 24.

		tlak [bar]	frekvence [Hz]						prům. def. [μm]
			1	5	10	15	20	25	
deformace [μm]	kanál 0	4	2	4	3	3	3	6	3.5
		40	55	55	56	56	56	58	56.0
	kanál 1	4	21	28	28	26	25	27	25.8
		40	292	289	293	292	295	299	293.3
	kanál 2	4	9	11	11	12	10	10	10.5
		40	60	61	62	62	61	61	61.2
	kanál 3	4	18	22	9	13	16	14	15.3
		40	281	277	282	281	280	280	280.2

Tabulka 7 hodnoty deformací pro tlak 40 bar



Obr. 24 závislost deformace na tlaku a frekvenci pro tlak 40 bar

3.5 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ TLAKOVÝMI PULZACEMI

Z grafů je patrné, že se amplituda deformace v závislosti na frekvenci skoro neliší a je téměř konstantní. Jednotlivé odchylky mezi příslušnými kanály mohou být způsobeny chybou měření, která nastává při nepřesnosti nalepení tenzometru. Při odchýlení o 5° může vzniknout chyba 1%.

4 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl analyzován současný stav provádění zkoušek pulsujícím tlakem mezi RBCB/ETC a GS/ETC na dvou různých zařízeních odlišné konstrukce, generujících pulzující tlak. V současné době se zkoušení provádí na normále viz obr. 8 z kapitoly 2.5. Tato normála byla navržena k ověření obou zařízení.

Rozdílnost provádění zkoušek spočívá v konstrukční odlišnosti obou zařízení a v různém počtu cyklů do porušení při zkoušení reálného vzorku. Toto byl hlavní důvod k navržení normály.

Dále bylo navrženo srovnávací měření pomocí tenzometrů. Měření mělo za úkol ukázat na stávající normále, závislost velikosti deformace na zatěžujícím tlaku a jeho frekvenci u výše zmiňovaných firem.

Výsledky měření potvrzují správnost funkce zařízení PRO80HY v RBCB/ETC. Z grafů na obr. 18–24 je totiž patrné, že velikost deformace je závislá pouze na velikosti zatížení a nikoliv na velikosti frekvence. Nepatrné odchylky v naměřených výsledcích mezi jednotlivými kanály mohou být způsobeny chybou měření, která nastává při nepřesném nalepení tenzometru. Odchýlením směru nalepení o 5° může vzniknout chyba 1%.

Dále bude zapotřebí ověřit zařízení v GS/ETC tímto měřením s tenzometry na stávající normále nebo na nové. Nová normála by měla být navržena tak, aby došlo k jejímu porušení přibližně při milionu cyklů.

Výsledky této práce byly využity k ověření zařízení v RBCB/ETC a také by tento navržený postup mohl posloužit při návrhu metodiky porovnávacích zkoušek v rámci zkoušek ve společnosti Bosch.

Seznam použité literatury

- [1] ČERNOHORSKÝ, Jiří a Antonín ŘEHÁK. *Zkušebnictví ve strojírenském průmyslu* [online]. 2001 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33704
- [2] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů, 1. díl*. 4. doplněné. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010, s 18, ISBN 978-80-7372-573-0
- [3] VĚCHET, Satnilav a Petr KRÁL. Únava materiálu. [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materialy/7tUnava.doc
- [4] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka, 3. svazek*. první. Praha: SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993, s 183, ISBN 80-85827-23-9
- [5] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka, 3. svazek*. první. Praha: SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993, s 155, ISBN 80-85827-23-9
- [6] KOTÝNEK, Milan. *Únavové vlastnosti nádoby filtru palivového čerpadla*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [7] WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: [http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/tenzometryHBM_CZ.pdf](http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/tenzometryHBM_CZ.pdf)
- [8] VLK, Miloš, Lubomír HOUFÉK a Pavel HLAVOŇ. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA*. Brno, 2003. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/studium/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [9] PLÍVA, Zdeněk a Jindra DRÁBKOVÁ. *METODIKA ZPRACOVÁNÍ DIPLOMOVÝCH, BAKALÁŘSKÝCH A VĚDECKÝCH PRACÍ NA FM TUL*. Liberec, 2009. ISBN 978-80-7372-189-3. Technická univerzita v Liberci

Poznámka:

Další fotografie a materiály jsou umístěny na přiloženém CD.